

УДК 62–623.1, 62–68, 661.91–404, 665.6/.7

## Перспективы регазификации СПГ

А. Г. ФАЛЬМАН<sup>1</sup>, Д. Э. АГЕЙСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>falmalex@mail.ru, <sup>2</sup>ageiskiyd@gmail.com

ООО «Криогазтех»,

199106, г. Санкт-Петербург, 26 линия В. О., 15, корп. 2 лит. А

*Статья посвящена обзору перспектив обеспечения утилизации холода регазифицируемых криопродуктов, в частности сжиженного природного газа (СПГ). В настоящее время происходит постепенный переход от традиционных схем регазификации к более современным, использующим холод сырья для производства побочных продуктов (например, электроэнергии). Авторами, на основе примененных методик эксергетического анализа характеристик установок регазификации, реализующих различные способы (циклы Ренкина и Брайтона и их комбинации, совмещение с газо- и воздухоразделением и т. п.), дается приблизительная оценка объемов побочной продукции, которая могла бы быть получена. Так, отношение выхода тех или иных продуктов (жидких кислорода LOX и азота LN<sub>2</sub>, электроэнергии E<sub>out</sub>) позволяет оценить, сколько продуктов может быть получено по данному способу при реализации 250 млн. т СПГ (причем одновременно): 14,8 млн. т жидкого кислорода, 28,4 млн. т жидкого азота и 15 ТВт·ч электроэнергии. Регазификации такого количества СПГ хватило бы для ректификации таким способом 71,2 млн. т воздуха. Приводятся доли всемирного энергопотребления по отдельным видам энергоносителей, которые могли бы быть покрыты за счет когенерации электроэнергии при регазификации. Полученные результаты позволяют рассматривать данное направление повышения энергоэффективности криогенных установок как перспективное.*

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ (СПГ), регазификация, цикл Ренкина, цикл Брайтона, воздухоразделительные установки (ВРУ).

## LNG regasification prospects

A. G. FALMAN<sup>1</sup>, D. E. AGEYSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>falmalex@mail.ru, <sup>2</sup>ageiskiyd@gmail.com

LLC «Kriogazteh»

199106, Russia, St. Petersburg, 26th line VO, 15

*The article describes prospects of cold utilization from LNG being regasified. There are several modern techniques allowing energy and some other by-products to be produced along with regasification itself. Exergy analysis is used to estimate the amount of by-products for techniques using Rankine and Brayton cycles, air and gas separation etc. Yield ratio of some products (liquid oxygen LOX, liquid nitrogen LN<sub>2</sub>, energy E<sub>out</sub>) allows estimating the amount of products to be simultaneously produced by this method when 250 million tons of LNG is utilized (14.8 million tons of liquid oxygen, 28.4 million tons of liquid nitrogen and 15 TWh of energy). Regasification of LNG equal amount is sufficient for rectification of 71.2 million tons of air by the same method. Fractions of overall energy consumption that could be covered by such an energy cogeneration are considered. Results of this research show possible viability of combined regasification techniques.*

**Keywords:** liquid natural gas, LNG, regasification, Rankine cycle, Brayton cycle, air separation.

Данная статья посвящена обзору перспектив использования холода регазификации. Оцениваются масштабы производства СПГ, количество возможных побочных продуктов, которые могли бы быть произведены при его регазификации, а также то, какую долю потребностей современного рынка энергии полученные продукты могли бы обеспечить.

Данные по объемам производства СПГ в мире разнятся. Так, выпущенный в 2013 г. обзор группы аналитиков Энергетического центра Сколково [1] оценивает производство СПГ на уровне 250 млн. т в год. В то же время, обзор за 2013 г., выпущенный *International Gas Union* [2] отмечает в 2013 г. незначительный спад объемов производства СПГ до 237,7 млн. т (по сравнению с 241.6 млн. т в 2012 г.).

Для простоты расчетов, при оценке количества побочных продуктов, которые могут быть когенерированы при утилизации холода регазификации СПГ, была выбрано значение 250 млн. т.

В случае, когда речь идет об оценке эффективности работы тех или иных технологических процессов и установок, нередко применяются методы эксергетического анализа. Разработке и применению подобных методик посвящены многочисленные как зарубежные [3], так и отечественные [4] работы. Применению к анализу энергоэффективности способов регазификации данных методов будет посвящена отдельная статья.

Необходимо также кратко пояснить, о каких конкретных способах регазификации может идти речь. Нами рассматривались как относительно распространенные ра-

нее традиционные способы регазификации с подогревом и испарением СПГ в змеевиках [5] или атмосферных испарителях [6–8], так и более современные и совершенные способы. К последним можно отнести способы, базирующиеся на применении открытого или замкнутого циклов Ренкина (таких, как например, в защищенных патентами [9–11] установках), цикле Брайтона и его комбинации с циклом Ренкина [12, 13], совмещении регазификации с воздуходелением [14] или фракционированием СПГ.

С эксергетической точки зрения СПГ содержит значительный потенциал, который можно преобразовать в полезную работу. Изменение эксергии в процессе рассчитывается как разница между значениями эксергий компонентов системы для начального и конечного состояний:

$$\Delta Ex^{RG} = (H_{LNG} - T_{oc} S_{LNG}) - (H_{NG} - T_{oc} S_{NG}).$$

Эта величина для регазификации составляет 250 кДж/кг или 70 кВт·ч/т.

250 млн. т СПГ, таким образом, переходя при регазификации в равновесие с температурой окружающей

среды, теоретически могли бы выработать около 17,5 ТВт·ч полезной работы. Разумеется, в реальности эффективность извлечения такой работы много меньше 100%. Если принять, например, 40% эффективность преобразования этой энергии в полезную работу, то можно было бы получить 7 ТВт·ч энергии, что соответствует примерно 614,6 тыс. т нефтяного эквивалента.

Показательным является сравнение этого количества энергии с общемировым производством. По данным отчета *British Petroleum* [15] распределение вырабатываемой на 2011 г. электроэнергии между способами ее выработки приводится ниже (см. табл. 1). Упомянутые выше 7 ТВт·ч — это почти 14% от всей ветровой энергии, выработанной в 2012 г. в Германии (50,75 ТВт·ч) или 33,8% от аналогичной величины для Великобритании за тот же период.

Такие относительно небольшие выходы энергии могут быть значительно повышены, если применить комбинированные способы, включающие регазификацию в состав комплексов, в которых холод регазифицируемого СПГ используется для дополнительной выработки таких побочных продуктов, как электроэнергия (различные тепловые машины с циклами Ренкина или Брайтона) или продукты разделения газовых смесей (воздухоразделительные установки (ВРУ) или установки фракционирования СПГ). В этом случае, выход электроэнергии будет значительно больше. Обратной стороной станет необходимость в сожжении части газа для обеспечения работы тепловых машин, однако доля этих затрат топлива как правило невелика.

По построенным моделям определялось отношение выхода электроэнергии и/или побочных продуктов к расходу сырьевого и продуктового газа (см. табл. 2). Данные приводятся для следующих описанных моделями способов:

— погружной подогреватель с газотурбинным генератором (SCV+GT);

Таблица 1

**Доля потенциала регазифицируемого СПГ в выработке электроэнергии**

	2011 г, ТВт·ч	Доля энергии утилизации холода СПГ (при 40% эффективности), %
Нефтепродукты	46469,1	0,011
ПГ	34364,1	0,015
Угли	46002,0	0,011
АЭС	6970,2	0,075
ГЭС	9204,9	0,057
Биотопливо	684,6	0,767
Возобновляемые	2265,3	0,232
Суммарное производство	145960,2	0,004

Таблица 2

**Удельный выход побочных продуктов для способов регазификации**

Способы регазификации	СПГ, кг/ч	ПГ, кг/ч	$E_{out}$ , кВт	$E/СПГ$ , кВт·ч/кг	$E/ПГ$ , кВт·ч/кг	$E$ на 250 млн. т, ТВт·ч
SCV+GT	176200	173100	12110	0,068	0,069	17
ORC+GT	106300	103100	24790	0,233	0,2402	58
CBC+GT	127200	122900	35270	0,277	0,287	69
ASU+ORC+GT	281000	276700	17260	0,061	0,062	15

Таблица 3

**Материально-тепловой баланс способа регазификации с ВРУ**

Поток	Расход, кг/ч	Доля от СПГ	Доля от ПГ
СПГ	281000	1	1,015
ПГ	276700	0,985	1
LOX	16700	0,059	0,060
LN <sub>2</sub>	31870	0,113	0,115
$E_{out}$ , кВт	17260	0,061	0,062
Воздух ВРУ	80000	0,285	0,289
Азот (газ)	31430	0,111	0,113

- органический цикл Ренкина с газотурбинным генератором (ORC+GT);
- замкнутый цикл Брайтона с газотурбинным генератором (CBC+GT);
- ВРУ с органическим циклом Ренкина и газотурбинным генератором (ASU+ORC+GT);
- регазификация с фракционированием СПГ (IRP).

Таким образом, применяя описанные методы и, используя дополнительно теплотворную способность части потока СПГ, выход электроэнергии может быть значительно повышен. В этом случае при регазификации 250 млн. т СПГ может быть выработано от 15 ТВт·ч (для способа с ВРУ, где значительная часть энергии уходит на выработку других побочных продуктов — жидких азота и кислорода) до 69 ТВт·ч для наиболее энергоэффективного (хоть и имеющего свои недостатки) способа с циклом Брайтона.

Для сравнения, годовое энергопотребление Нью-Йорка в 2010 г. — 60 ТВт·ч [16].

Два из вышеописанных способа позволяют в числе побочных продуктов вырабатывать не только электроэнергию, но и продукты разделения газовых смесей: разделения воздуха с получением жидкого азота и кислорода (ASU+ORC+GT) или фракционирование СПГ с выделением этановой и С3+ фракций (IRP).

Последний вариант экономически целесообразен только в тех случаях, если подаваемый на регазификацию СПГ содержит в себе значительную долю этих фракций, что накладывает значительные ограничения на область применения данных способов. Потому более показательной является оценка возможного выхода побочных продуктов для ВРУ (ASU+ORC+GT).

Данные табл. 3 (см. стр. 47) содержат в себе показатели по материально-энергетическому балансу схемы с ВРУ, органическим циклом Ренкина и газотурбинным генератором. Отношение выхода тех или иных продуктов (жидких кислорода (LOX) и азота (LN<sub>2</sub>), электроэнергии ( $E_{\text{out}}$ )) позволяет оценить, сколько продуктов может быть получено по данному способу при реализации 250 млн. т СПГ (причем одновременно): 14,8 млн. т жидкого кислорода, 28,4 млн. т жидкого азота и 15 ТВт·ч электроэнергии. Регазификации такого количества СПГ хватило бы для ректификации таким способом 71,2 млн. т воздуха.

Приведенные расчеты показывают, что у способов утилизации холода регазификации СПГ есть значительный потенциал. Однако, выгода, извлекаемая при утилизации, в значительной степени зависит от примененных способов, оборудования, входящего в установки, осуществляющие эти способы и т. п. Поэтому требуется дальнейшая проработка данных способов, их сравнение и выделение наиболее перспективных. Кроме того, требуется проведение оценки экономической целесообразности вложения значительных средств, необходимых для строительства таких установок.

Оценка стоимости необходимого для реализации различных способов регазификации оборудования может быть произведена по одной из существующих методик. Как правило, подобные методики (как, например, описанные в работах [3, 17]) требуют для расчета возможной стоимости данные об основных эксплуатационных и технологических характеристиках оборудования (давление

нагнетания, производительность, варианты исполнения и т. п.). Поэтому адекватная оценка стоимости такого оборудования невозможна без проведения предварительного анализа, определяющего наиболее желательные значения таких параметров для входящего в установку оборудования.

Таким образом данная работа показывает как актуальность рассматриваемой тематики, разработками в области которой заняты представители крупнейших газопроизводящих и газопотребляющих корпораций (таких как Linde, Kobe Steel, Hitachi и др.), так и высокую вероятность повышения энергетической и экономической эффективности систем регазификации СПГ в случае реализации ряда описанных способов утилизации его холода.

### Список литературы (References)

1. Выгон Г., Белова М. Развитие мирового рынка СПГ: вызовы и возможности для России. // Энергетический центр Московской школы управления Сколково. 2013. [Vygon G., Belova M. Development of the world market of LNG: calls and opportunities for Russia. *Energetic center of Moscow School of Management Skolkovo*. 2013. (in Russian)]
2. IGU World LNG Report — 2013 Edition. *International Gas Union*. 2013
3. Seider W. D., Seader J. D., Lewin D. R. Product and Process design principles. Wiley, 2002.
4. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. — М., Энергия, 1973. 296 с. [Brodyanskii V. M. Eksergetichesky method of the thermodynamic analysis. Moscow, 1973. 296 p. (in Russian)]
5. Патент № 119846 Российская Федерация, МПК F17C9/02. Газификационная установка / К. В. Ноговицин, В. А. Ноговицин. №2012100874. [Patent No 119846 Russian Federation, MPK F17S9/02. Gasification installation. K. V. Nogovitsin, V. A. Nogovitsin. (in Russian)]
6. Патент № 1520298 СССР, МПК F25B39/02, F17C7 Криогенный испаритель / В. П. Ельчинов, А. И. Смородин, А. Г. Лапшин, Н. И. Глебов, В. В. Попов. № 4337226/23–26; заявл. 01.12.1987; опубл. 07.11.1989. [Patent No 1520298 USSR, MPK F25B39/02, F17C7 Cryogenic evaporator. V. P. El'chinov, A. I. Smorodin, A. G. Lapshin, N. I. Glebov, V. V. Popov. (in Russian)]
7. Патент № 1176137 СССР, МПК F17C9/02 Установка для газификации криогенной жидкости / Г. С. Виницкий, Н. Р. Васильев, В. Г. Виницкий. № 3516767/23–26; заявл. 01.12.1982; опубл. 30.08.1985, Бюл. 32. [Patent No 1176137 USSR, MPK F17C9/02. Installation for gasification of cryogenic liquid. G. S. Vinitkii, N. R. Vasil'ev, V. G. Vinitkii. (in Russian)]
8. Патент № 132521 Российская Федерация, МПК F17C9/02, F17C13 Система регазификации сжиженного природного газа / заявитель и патентообладатель ООО НПФ «Криоген-Холод-Технология». № 2012150625. [Patent No 132521 Russian Federation, MPK F17C9/02, F17C13. System of regasification of the liquefied natural gas. Applicant and patent holder of JSC NPF Kriogen-Holod-Tekhnologiya. (in Russian)]
9. Патент № 1456688 СССР, МПК F17C9/02 Газификационная установка / С. И. Загривый. № 90686/23–26; заявл. 04.02.1989; опубл. 07.02.1989, Бюл. 5. [Patent No1456688 USSR, MPK F17S9/02 Gasification installation. S. I. Zagriyvi. (in Russian)]

10. Patent CN101238322 (B) КНР, МПК F01K25/00, F17C9/02, F17C9/04 Configurations and methods for power generation in LNG regasification terminals. Mak J.; Applicant and patent holder of Fluor Tech Corp. CN200682610220060717; published 14.11.2012.
11. Patent DE 10201056585 (A1) WIPO, МПК F17C9/02 Liquefied arrangement used as subsystem for increasing temperature of liquefied natural gas (LNG), has inlet for power plant process which is open, and output for LNG is connected to piping system representing flow from plant process. Dr Mosemann Dieter; Applicant and patent holder of Gea Batignolles Technologies Thermique — DE201010056585; published 06.06.2013. URL:
12. Patent JP S5773299A WIPO, МПК F17C9/02 Gasification of liquefied natural gas. Asada Kazuhiko; Jinbou Atsushi; Tanigaki Yasuhiro; заявитель и патентообладатель Kobe Steel Ltd — JP1980014969119801024.
13. Patent JPS5471422AWIPO, МПК F17C9/04 A method of recovering LNG gasifying power. Nagai Susumu; Asada Chiyoukei; Applicant and patent holder of Hitachi Shipbuilding Eng Co. JP1977013823619771116.
14. Патент № 2460952 Российская Федерация, МПК-8 F25J3/04 Способ разделения воздуха / Л. А. Акулов, В. Н. Сычев, А. В. Зайцев; заявитель и патентообладатель ООО «ЗИФ». №2010130511/06; заявл. 20.07.2010; опубл. 10.09.2012, Бюл. 25. [Patent № 2460952 Rossiiskaya Federatsiya, МПК-8 F25J3/04. Air division method. L. A. Akulov, V. N. Sychev, A. V. Zaitsev; Applicant and patent holder of ООО «ЗИФ». №2010130511/06 (in Russian)]
15. BP Energy outlook 2030. URL: <http://ebookbrowse.net/bp-energy-outlook-2030-summary-tables-xls-d69781265>.
16. How many wind turbines would it take to power all of New York City? *School of Engineering*. March 30, 2010. URL: <http://engineering.mit.edu/ask/how-many-wind-turbines-would-it-take-power-all-new-york-city>.
17. Calpine Fuels Diversity Initiative: Integrated Gasification Combined Cycle Power Plants. URL: <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/turbines/lzzo.pdf>.

Статья поступила в редакцию 26.01.2015

## Требования к рукописям, представляемым в журнал «Вестник МАХ»

- В начале статьи, слева – УДК;
- После названия статьи – авторы с указанием места работы и контактной информации (e-mail);
- Отдельно указываются ключевые слова на русском и английском (не более десяти);
- Одновременно со статьей представляется аннотация на русском и английском языках. Аннотация должна содержать от 200 до 250 слов (приблизительно 1500 печатных знаков). Аннотация должна быть полноценной и информативной, не содержать общих слов, отражать содержание статьи и результаты исследований, строго следовать структуре статьи.
- Статьи представляются набранными на компьютере в текстовом редакторе Word 97-2007 на одной стороне листа через 1,5 интервала, размер шрифта 14.
- Объем статьи не более 15 страниц (формат А4, вертикальный, 210x297 мм; поля: левое - 2 см, правое - 2 см, верхнее – 2 см, нижнее - 2 см);
- Иллюстрации представляются на магнитном носителе в следующем формате: растровые - TIFF-CMYK-300 dpi, TIFF-VM-800 dpi, векторные - EPS-CMYK4
- Формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation). (не вставлять формулы из пакетов MathCad и MathLab).
- В статьях необходимо использовать Международную систему единиц (СИ);
- Список литературных источников должен быть оформлен по ГОСТу и содержать ссылки только на опубликованные работы. Номера ссылок в тексте должны идти строго по порядку их цитирования и заключаться в квадратные скобки. Количество пристатейных ссылок не менее 10-15

*Статьи, оформленные с нарушением правил, редакцией не принимаются и возвращаются авторам без рассмотрения по существу. Автор гарантирует отсутствие плагиата и иных форм неправомерного заимствования результатов других произведений.*

### Данные об аффилировании авторов (author affiliation).

На отдельной странице и отдельным файлом: – сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), должности основного места работы (учебы); наименование и почтовые адреса учреждений, в которых работают авторы, e-mail.

Статьи принимаются на магнитном носителе и в печатном экземпляре или высылаются на электронный адрес редакции [vestnikmax@rambler.ru](mailto:vestnikmax@rambler.ru)

**Плата за публикации не взимается**

**Дополнительная информация для авторов на сайте <http://vestnikmax.com>**